

Prof. dr hab. inż. Regina Paszkiewicz
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechnika Wroclawska
50-370 Wroclaw
ul. Janiszewskiego 11/17

Wroclaw, 28.10.2024

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Moniki Maslyk pt.: „Domieszkowanie warstw GaN tlenem metodą rozpylania magnetronowego i analiza kontaktów omowych z warstwą podkontaktową n⁺-GaN:O do n-GaN i tranzystorów AlGa_N/Ga_N HEMT”, wykonana dla Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej na podstawie uchwały w wym. Rady nr 833//II/2024 z dnia 15.10.2024 i pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny AEEiTK Politechniki Warszawskiej, prof. dr hab. inż. Tomasza Stareckiego z dnia 22.06.2024r.

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Lidia Łukasiak

Promotor pomocniczy: dr Pawel Prystawko

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?

Recenzowana rozprawa poświęcona jest aktualnej tematyce poprawy jakości kontaktów omowych do azotku galu i tranzystorów AlGa_N/Ga_N HEMT. Tematyka ta jest intensywnie badana od wielu lat w ośrodkach badawczych i przemysłowych jednak niezbędne jest dalsze doskonalenie jakości kontaktów omowych, szczególnie w przyrządach azotkowych przeznaczonych do zastosowań ponadnormatywnych takich jak np. elementy dużych mocy, w tym mikrofalowych, oraz elementy pracujące w wysokich temperaturach. Jednym z istotnych wątków w tych badaniach jest wyjaśnienie roli tlenu w powstawaniu kontaktów omowych do azotków i jego wpływ na morfologię wytwarzanych kontaktów, co jest tym bardziej istotne, że technologia nanometrowych bramek azotkowych tranzystorów MESFET i HEMT, pracujących przy częstotliwościach rzędu dziesiątek GHz i częstotliwościach sub-THZ, w zastosowaniach np. do telefonii 6G, wymaga dalszego doskonalenia morfologii kontaktów omowych, kluczowych dla wydajności i jakości procesów litografii bramek.

Rozprawa mgr inż. Moniki Maslyk dobrze wpisuje się w ten nurt badań. Sformułowała ona tezę, że „tlen może być efektywną domieszką donorową wprowadzaną do warstw GaN

w sposób intencjonalny i kontrolowany” co pozwoliłoby na poprawę parametrów warstw podkontaktowych i wytworzenie kontaktów o mniejszej rezystancji.

Do udowodnienia sformułowanej tezy przyjęła ona cały szereg prawidłowo zdefiniowanych, cząstkowych, hipotez badawczych. Autorka rozprawy prawidłowo sformułowana tezę pracy oraz właściwie dobrała cele szczegółowe, które pozwoliły na jej udowodnienie. Praca ma duży element nowości, a jej tematyka jest istotna dla badań podstawowych i aplikacyjnych.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł w tym literatury światowej i stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle?

Autorka rozprawy przeprowadziła wszechstronną analizę danych z literatury światowej z zakresu technologii kontaktów omowych do przyrządów elektronicznych na bazie azotków trzeciej grupy układu okresowego oraz intencjonalnego i nieintencjonalnego domieszkowania tlenem warstw, struktur przyrządowych i przyrządów na bazie azotków. Wpływ tlenu na właściwości strukturalne azotków i tworzenie się defektów jest dość dobrze zbadany, natomiast do chwili obecnej nie jest jasna jego rola jeżeli chodzi o ich właściwości elektryczne, powstawanie kontaktu metal-półprzewodnik i jego parametry. Przeprowadzony przegląd literatury jest obszerny i aktualny, uwzględniono również w nim aktualne trendy technologiczne, również te stosowane w przemyśle półprzewodnikowym, np. w postaci prób zmniejszenia temperatury formowania kontaktów omowych oraz prób uproszczenia technologii tranzystorów, co zostało zaproponowane w rozprawie w formie zastosowania warstwy podkontaktowej n^+ -GaN:O, wytwarzanej techniką rozpylania magnetronowego, a nie selektywną epitaksją warstw n^+ -GaN:Si. Przegląd literaturowy obejmuje 210 pozycji. Autorka rozprawy prawidłowo i przekonująco sformułowała wnioski z analizy źródeł literaturowych. Mgr inż. Monika Masłyk dokonała właściwego doboru źródeł, prawidłowo je wykorzystała i zaprezentowała. Świadczy to o dobrej znajomości tematyki badawczej.

3. Czy Autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

W celu udowodnienia postawionej tezy rozprawy mgr inż. Monika Masłyk zbadała proces intencjonalnego domieszkowania tlenem warstw GaN, na typ n, w procesie rozpylania magnetronowego, przeanalizowała mechanizm tego domieszkowania oraz określiła właściwości strukturalne, elektryczne i optyczne warstw GaN:O. W kolejnym kroku Autorka rozprawy zastosowała przewodzące warstwy n-GaN:O jako warstwy podkontaktowe do

kontaktów omowych do n-GaN w celu poprawy ich rezystywności. Badania zostały prawidłowo podzielone na trzy zadania szczegółowe. Pierwsze z nich obejmowało zbadanie procesu intencjonalnego i nieintencjonalnego domieszkowania tlenem warstw GaN, wytwarzanych metodą rozpylania magnetronowego, przy użyciu różnych targetów (target ceramiczny na bazie polikrystalicznego GaN, objętościowy target GaN typu n wytworzony techniką HVPE oraz monokrystaliczny target GaN osadzony metodą amonotermalną), trybów rozpylania i warunków procesu oraz analizę potencjalnych mechanizmów domieszkowania warstw GaN. Kolejne zadanie szczegółowe obejmowało przeprowadzenie analizy procesu powstawania kontaktu omowego do n-GaN z przewodzącą warstwą podkontaktową n⁺-GaN:O oraz przeprowadzenie, techniką CTLM, charakteryzacji elektrycznej kontaktów formowanych w różnych temperaturach (500°C, 750°C oraz 850°C). Jako kontakty metaliczne stosowano wielowarstwy Ti/Al/Ti/TiN. W kolejnym zadaniu wyniki swoich badań mgr inż. Monika Masłyk zweryfikowała stosując opracowaną technologię do wytworzenia kontaktów omowych źródła i drenu w tranzystorze AlGaIn/GaN HEMT, z warstwą podkontaktową n⁺-GaIn:O. Jako struktury referencyjne wytworzyła tranzystory AlGaIn/GaN HEMT, z warstwą podkontaktową n⁺-GaIn:Si osadzoną metodą MOCVD, oraz tranzystory bez warstwy podkontaktowej, z częściowo wytrawioną barierą AlGaIn. Autorka rozprawy zbadała wpływ zastosowanej technologii wytwarzania kontaktów na charakterystyki wyjściowe i przejściowe tranzystorów.

Stwierdziła ona, że właściwości elektryczne warstwy podkontaktowej n⁺-GaIn:O oraz parametry elektryczne kontaktu omowego z warstwą podkontaktową n⁺-GaIn:O do n-GaN pozwalają na wytworzenie tranzystorów AlGaIn/GaN HEMT z najniższą wartością parametru R_{DSon} (rezystancja tranzystora w stanie włączenia), co jest bardzo istotnym parametrem tranzystorów polowych. Pozwoliło to jej na udowodnienie tezy pracy, że „tlen może być efektywną domieszką donorową wprowadzaną do warstw GaN w sposób intencjonalny i kontrolowany”. Do charakteryzacji warstw, kontaktów i testowych struktur tranzystorów AlGaIn/GaN HEMT Autorka rozprawy zastosowała bogaty i różnorodny zestaw technik charakteryzacji obejmujący: technikę FTIR, RBS, SIMS, TEM, XRD, XRR, SEM oraz CTLM.

Mgr inż. Monika Masłyk zrealizowała wszystkie zadania szczegółowe, zweryfikowała częściowe hipotezy badawcze i osiągnęła postawione cele rozprawy oraz udowodniła sformułowaną tezę. Zakres przeprowadzonych badań oraz ich wielowątkowość pozwalają stwierdzić, że do rozwiązania postawionych zagadnień zostały użyte właściwe metody

badawcze, które umożliwiły Autorce udowodnienie sformułowanej tezy pracy oraz potwierdziły, że przyjęte założenia badawcze były uzasadnione.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową.

Rozprawa jest oryginalna, a przedstawione wyniki prac doświadczalnych i pomiarów stanowią samodzielny i oryginalny dorobek mgr inż. Moniki Masłyk. Przeprowadzone przez nią badania pozwoliły na osiągnięcie celów szczegółowych rozprawy oraz udowodnienie jej tezy.

Do najważniejszych, oryginalnych, osiągnięć Autorki rozprawy należy zaliczyć:

- przeprowadzenie optymalizacji procesu rozpylania magnetronowego ukierunkowanego na uzyskanie warstw n-GaN:O o zadanej, dużej koncentracji elektronów ($\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) przy użyciu targetu z monokrystalicznego GaN wytwarzanego techniką amonotermalną,
- przygotowanie zgłoszenia patentowego bazującego na wynikach tych badań (Zgłoszenie: *Sposób wytwarzania półprzewodnikowej warstwy azotku galu o przewodnictwie typu n*, P. Prystawko, M. Boćkowski, E. Kamińska, M. Masłyk, E. Grzanka, P.442495, 11.10.2022 r., UP RP),
- wytworzenie kontaktu omowego do n-GaN z warstwą podkontaktową n+-GaN:O formowaną w niskiej temperaturze wygrzewania (500°C, 60 s., N₂), o ulepszonej względem kontaktów formowanych w wysokiej temperaturze morfologii,
- zbadanie wpływu opracowanych kontaktów omowych na charakterystyki elektryczne testowego tranzystora AlGaIn/GaN HEMT z warstwą podkontaktową n+-GaN:O.

Wyniki badań mgr inż. Moniki Masłyk są ważne dla rozwoju technologii tranzystorów AlGaIn/GaN HEMT oraz stanowią istotny wkład w badania nad uproszczeniem procesu ich wytwarzania, co jest ważne z punktu widzenia kosztów procesu technologicznego.

Uzyskane wyniki badań poddano weryfikacji środowiska naukowego przez publikacje Autorki rozprawy, które ukazały się w renomowanych czasopismach krajowych i zagranicznych oraz zaprezentowane na konferencjach naukowych.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Mgr inż. Monika Masłyk wykazała się umiejętnością właściwego i przekonującego przedstawienia uzyskanych wyników swoich badań obejmujących prace technologiczne

i pomiary. Dokonała ona też prawidłowego podziału treści rozprawy między poszczególnymi rozdziałami rozprawy, która jest logiczna, napisana starannie i poprawna pod względem językowym i stylistycznym. Większość rysunków ma odpowiednią jakość, wielkość i prawidłowe opisy za wyjątkiem rysunków nr: 1.1, 3.3, 3.5÷3.16 oraz 4.1, które zawierają anglojęzyczne opisy.

Ze względu na złożoność zagadnienia Recenzent uważa, że rozprawa nie ma istotnie słabych stron i niedoskonałości. Pewien niedosyt recenzenta budzi jedynie ograniczona ilość wytworzonych testowych tranzystorów AlGaIn/GaN HEMT.

Niezależnie od tych wątpliwości jednoznacznie stwierdzam na podstawie wyników prac technologicznych i pomiarów, że rozprawa przygotowana przez mgr inż. Monika Masłyk jest oryginalna i ma istotny element nowości.

6. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Rozprawa ma duże znaczenie dla rozwoju wiedzy ponieważ przedstawia kompleksowy opis badań nad intencjonalnym domieszkowaniem warstw GaN tlenem w procesie rozpylania magnetronowego targetu GaN zawiera ocenę wpływu parametrów procesu na właściwości cienkich warstw n⁺-GaIn:O. Autorka rozprawy wykazała ponadto, że opracowana, oryginalna, technologia może zostać zastosowana w praktyce do wytwarzania tranzystorów AlGaIn/GaN HEMT z warstwą podkontaktową n⁺-GaIn:O w obszarze źródła i drenu. Ponadto proces ten wymaga mniejszej ilości operacji i jest prostszy od klasycznego procesu stosowanego do tego celu polegającego na selektywnej epitaksji warstw podkontaktowych n⁺-GaIn:Si wytwarzanych technikami MOVPE lub MBE. Ponadto Autorka rozprawy wykazała, że możliwe jest intencjonalne i kontrolowane domieszkowanie tlenem warstw GaIn umożliwiające uzyskanie dużej koncentracji domieszki donorowej (aż do koncentracji (~10¹⁹ cm⁻³), niezbędnej do wytwarzania obszarów podkontaktowych źródła i drenu, w celu uzyskania i wytwarzania kontaktów omowych o małej rezystancji.

Ze względu na innowacyjność i walory poznawcze rozprawy oraz jej potencjalne możliwości aplikacyjne uważam ją za bardzo dobrą.

Recenzent stwierdza, że rozprawa mgr inż. Monika Masłyk stanowi oryginalny i samodzielny dorobek Autorki oraz spełnia z nadmiarem wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy.

Biorąc pod uwagę dorobek naukowy mgr inż. Moniki Masłyk i pozytywną ocenę Jej pracy doktorskiej uważam, że w myśl ustawy z 20 lipca 2018 r (Dz. U. Nr Dz.U.2022.574, z późn.

zm.) Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, mgr inż. Monika Masłyk Kamiński spełnia z nadmiarem wymagania stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne oraz wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony przedstawionej pracy.

Wnioskuję ponadto o wyróżnienie jej pracy ze względu na jej wartościowy wkład w problematykę opracowania kontaktów omowych tranzystorów AlGaIn/GaN HEMT o zmniejszonej rezystywności.

R. Perlicki